

KARAKTERISTIK TURBIN DARRIEUS DENGAN DAN TANPA SUDU TETAP PADA PROSES PEMANFAATAN ALIRAN AIR TEKANAN RENDAH MENJADI ENERGI MEKANIK

Victus Kolo Koten¹, Stevy Thioritz²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Atma Jaya, Makassar 90000.

Email: victus_koten@yahoo.com

² Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Atma Jaya, Makassar 90000.

Email: sthioritz@yahoo.com

Abstract: Characteristics of Darrieus Turbines with and without fixed blades on the process of utilizing low pressure water flow into mechanical energy. Nowadays

the utilization of low pressure water flow energy into mechanical energy has not been maximized. This study aims to examine the characteristics of Darrieus turbines with and without fixed blades on energy utilization processes at low pressure water flow into mechanical energy. The research was conducted on the water channel of PDAM Makassar City in Antang Area. Darrieus turbines equipped and not equipped with blades remain immersed in aqueducts alternately in the same places and conditions. As a result of the water flow causes the turbine to spin. The data retrieval process is done manually through the use of some laboratory equipment. The results show that the Darrieus turbine equipped with the blade still has better turbine characteristics. Turbine efficiency increases to 5 kg loading. Darrieus turbines that do not have fixed blades produce not optimal turbine characteristics. Turbine efficiency increases until the load reaches 4 kg. Turbine efficiency will decrease if the load reaches 5 kg. From the test results, if the load is increased again the turbine shaft will stop spinning. The Darrieus turbine equipped with a fixed blade enhances rotation, speed, linear, power, and turbine efficiency by 3.5%.

Keywords: Darrieus Turbine, low pressure water flow.

Abstrak : Karakteristik Turbin Darrieus dengan dan tanpa sudu tetap pada proses pemanfaatan aliran air tekanan rendah menjadi energi mekanik. Hingga saat ini,

pemanfaatan energi aliran air tekanan rendah menjadi energi mekanik belum maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik turbin Darrieus dengan dan tanpa sudu tetap pada proses pemanfaatan energi pada aliran air tekanan rendah menjadi energi mekanik. Penelitian dilakukan pada saluran air baku PDAM Kota Makassar di Wilayah Antang. Turbin Darrieus yang dilengkapi dan tidak dilengkapi dengan sudu tetap dicelupkan ke dalam saluran air secara bergantian pada tempat dan kondisi yang sama. Akibat aliran air tersebut menyebabkan turbin berputar. Proses pengambilan data dilakukan secara manual melalui penggunaan beberapa peralatan laboratorium. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa turbin Darrieus yang dilengkapi dengan sudu tetap memiliki karakteristik turbin yang lebih baik. Efisiensi turbin mengalami peningkatan hingga pemberian beban 5 kg. Turbin Darrieus yang tidak memiliki sudu tetap menghasilkan karakteristik turbin yang tidak maksimal. Efisiensi turbin mengalami peningkatan hingga pemberian beban mencapai 4 kg. Efisiensi turbin akan mengalami penurunan jika pemberian beban mencapai 5 kg. Dari hasil pengujian, jika pemberian beban ditingkatkan lagi maka poros turbin akan berhenti berputar. Turbin Darrieus yang dilengkapi dengan sudu tetap dapat meningkatkan putaran, kecepatan keliling, kecepatan linier, daya, dan efisiensi turbin sebesar 3,5 %.

Kata Kunci: Turbin Darrieus, aliran air tekanan rendah.

PENDAHULUAN.

Sebagai sumber energi terbarukan, aliran air menyimpan energi tekanan tinggi dan energi tekanan rendah. Pemanfaatan energi aliran air tekanan tinggi telah banyak dilakukan di berbagai wilayah di dunia. Hingga saat ini, pemanfaatan energi aliran air tekanan rendah untuk berbagai keperluan masih sangat minim. Untuk mengkonversi energi aliran air tekanan rendah menjadi energi mekanis biasanya menggunakan berbagai jenis kincir air, turbin air berporos horisontal, dan turbin air berporos vertikal.

Hingga saat ini, pengembangan turbin yang berporos vertikal masih terfokus pada turbin Savonius, turbin Darrieus, dan turbin Gorlof. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Gorban et al. 2016), turbin Darrieus memiliki efisiensi yang lebih baik dari pada turbin Savonius dan lebih rendah dari pada turbin Gorlov. Meskipun demikian, turbin Darrieus memiliki konstruksi yang lebih mudah untuk dikembangkan.

Turbin Darrieus adalah salah satu jenis turbin angin. Sejak dipatenkan pada tahun 1931, turbin Darrieus telah dijadikan sebagai objek penelitian baik itu berhubungan dengan sumber energi penggerak maupun modifikasi pada konstruksi turbin. Penelitian yang berhubungan dengan sumber energi penggerak telah dilakukan oleh (Faez et al. 2012), (Battisti et al. 2016), (Loots et al. 2015), (Maître et al. 2013), (Mertens 2005), (Toja-Silva et al. 2013), dan yang berhubungan dengan modifikasi pada konstruksi turbin telah dilakukan oleh (Abdul Akbar & Mustafa 2016), (Batista et al. n.d.), (Beri & Yao 2011), (Guerrero-villar et al. 2015), (Ismail & Vijayaraghavan 2015), dan (Vasthava & Kumar 2015). Meskipun demikian penelitian-penelitian tersebut tidak

menggunakan konstruksi sudu tetap pada turbin Darrieus.

Penelitian tentang modifikasi pada konstruksi turbin meliputi modifikasi pada lengan, modifikasi pada sudu gerak, dan modifikasi pada sudu tetap. Khusus modifikasi pada sudu tetap, pemodifikasian dilakukan selain untuk mengarahkan fluida sebelum dan setelah menumbuk sudu gerak maupun untuk meningkatkan kecepatan fluida sebelum menumbuk sudu gerak. Kajian tentang modifikasi ini telah dilakukan oleh (Beri & Yao 2011), dan (Battisti et al. 2016). Meskipun demikian, modifikasi-modifikasi sudu tetap tersebut hanya dilakukan pada sumber energi angin. Modifikasi sudu tetap pada sumber energi aliran air tekanan rendah belum dilakukan.

Oleh karena hal-hal tersebut di atas, penelitian ini difokuskan pada modifikasi sudu tetap turbin Darrieus dengan fluida penggerak aliran air tekanan rendah. Kajian dilakukan secara eksperimen, jumlah sudu gerak turbin sebanyak tiga buah, tidak ada perubahan volume air pada tiap detik, dan distribusi kecepatan air pada penampang saluran dianggap sama.

Beberapa kajian tentang karakteristik turbin, sumber energi aliran air tekanan rendah sebagai penggerak, dan modifikasi sudu tetap pada turbin Darrieus diperlihatkan sebagai berikut.

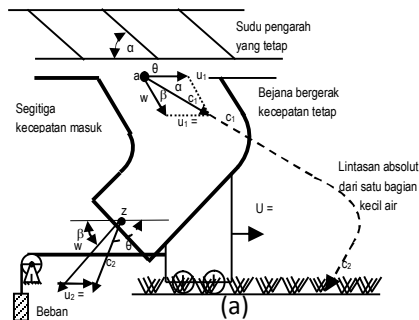
Karakteristik Turbin.

Parameter karakteristik tiap turbin pada umumnya memiliki besaran yang berbeda-beda. Perbedaan besaran atau nilai dari tiap karakteristik ini tergantung pada bentuk konstruksi sudu turbin dan konstruksi turbin secara keseluruhan. Bentuk sudu yang dirancang harus memperhitungkan adanya tiga jenis kecepatan; kecepatan relatif, mutlak, dan kecepatan tangensial. Hubungan dari

ketiga jenis kecepatan ini akan membentuk segitiga kecepatan yang sering menjadi penentu karakteristik suatu turbin.

Gaya air yang dihasilkan dapat dituliskan dengan persamaan, $F = mc_1 - mc_2$ sehingga untuk tiap detik $F = \dot{m}(c_1 - c_2)$ yang mana $\dot{m} = \rho \dot{v}$ atau

$$F = \rho \dot{v}(c_1 - c_2) \quad (1)$$



Gambar 1. (a) Gaya yang timbul akibat aliran fluida. (b) Segitiga kecepatan
Sumber: Fritz Diisel.

Proses pemindahan gaya ini ke turbin dapat diperlihatkan secara eksperimen pada gambar 1a. Melalui sudu tetap sebagian kecil air dialirkan ke dalam bejana yang diletakkan di atas kereta sesuai sudut α_1 dengan kecepatan c_1 sehingga kereta bergerak tanpa gesekan dengan kecepatan u dan membawa beban. Berdasarkan kecepatan c_1 dan u maka kecepatan w_1 dapat diperoleh sesuai aturan segitiga kecepatan. Pada bagian output; bila suatu bagian kecil air mengalir sampai di bagian ujung keluar bejana kecepatannya berubah dari w_1 ke w_2 dan arah juga berubah dari α_1 dan α_2 disebabkan karena pengecilan penampang dan kelengkungan bejana sedangkan kecepatan kereta u tetap sehingga c_2 dapat diperoleh berdasarkan aturan segitiga kecepatan. Yang mana c , w , dan u berturut-turut adalah kecepatan mutlak karena daerah sekelilingnya adalah diam atau tidak bergerak, kecepatan relatif karena berhubungan dengan bagian sebelah dalam bejana yang bergerak dan

kecepatan tangensial roda turbin. Secara umum vector kecepatan dapat ditulis dengan $w = c - u$.

Dari gambar 3 diperoleh,

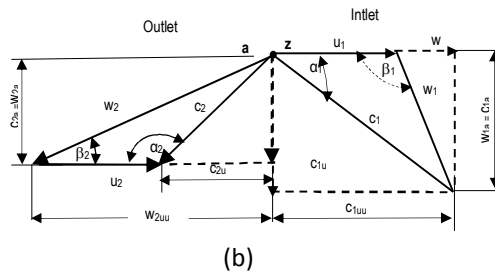
$$w_{1u} = c_{1u} - u \quad \text{dan}$$

$$w_{2u} = c_{2u} + u \quad (2)$$

dimana, $c_u = c \cos \alpha$ dan $w_u = w \cos \beta$.

Dari kaidah impuls,

$$F_u = \rho \dot{v}(w_{1u} - w_{2u}) \quad \text{dan}$$



$$F_a = \rho \dot{v}(w_{1a} - w_{2a}) \quad (3)$$

dari persamaan (2) dan (3)

$$F_u = \rho \dot{v}(c_{1u} - c_{2u}) \quad (4)$$

Aliran di dalam bejana bisa dianggap sebagai aliran air di dalam saluran sudu-sudu yang terdapat pada roda turbin. Bila r adalah jarak dari titik pusat ke tempat bekerjanya gaya tangensial F_u maka pada poros turbin akan bekerja momen sebesar,

$$M_t = F_u \cdot r \quad \text{atau} \quad M_t = \rho \dot{v} r (c_{1u} - c_{2u}) \quad (5)$$

Kecepatan keliling turbin didefinisikan sebagai $u = \pi D n = \omega_n r$ sehingga energy mekanis yang dihasilkan turbin setiap detik adalah sebesar,

$$N_t = M_t \cdot \omega_n \quad \text{atau} \quad N_t = \rho \dot{v} u (c_{1u} - c_{2u}) \quad (6)$$

yang mana N_t , M_t , ω_n berturut-turut adalah daya turbin, momen torsi, dan kecepatan sudut turbin.

Pemanfaatan aliran air tekanan rendah sebagai penggerak turbin Darrieus.





a. J. Chen a (2012). Melakukan Penelitian yang bertujuan untuk

mengetahui karakteristik beberapa jenis turbin pada proses pemanfaatan aliran air dalam pipa sebagai pembangkit energi mekanik. Hasil penelitiannya diperlihatkan pada gambar 2.

- b. B.K. Kirke. (2010). Melakukan Penelitian yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik beberapa jenis turbin Darrieus pada proses pemanfaatan aliran air tekanan rendah menjadi energi mekanik. Objek penelitiannya diperlihatkan pada gambar 3. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa cp maksimum diperoleh pada kecepatan aliran 1,5 m/s baik turbin darius type H dan heliks tanpa difuser.

Modifikasi sudu tetap pada turbin Darrieus.

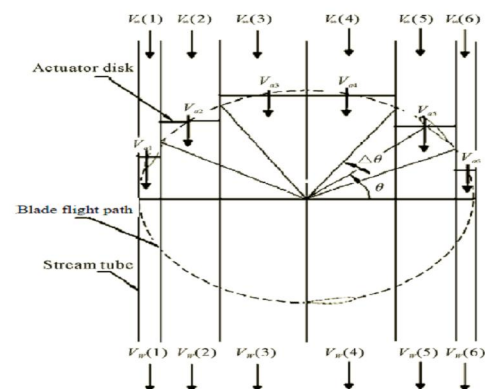
- a. Habtamu Beri (2011). Melakukan Penelitian yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik turbin angin dalam sudu tetap yang dimodifikasi. Objek penelitiannya diperlihatkan pada gambar 4. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penggunaan metode komputasi CFD lebih baik dari pada metode eksperimen.
- b. L. Battisti (2016) Melakukan Penelitian yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik sudu tetap pada pengujian dengan kondisi kemiringan tertentu. Objek penelitiannya diperlihatkan pada gambar 5. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa sudut maksimal wind tunnel yang bisa digunakan dalam desain maupun percobaan adalah 15° .

Drag type turbine design		Max power (W)	Head drop (m)
1st gen: 5-blade solid turbine ($\varnothing 86$ mm) + vertical half block		0	0
1st gen: 5-blade solid turbine ($\varnothing 92$ mm) + 80% short slanted block		12.0	N/A
2nd gen: 6-blade solid turbine ($\varnothing 92$ mm) + 90% slanted eye shaped block		32.2	5.82
3rd gen: 12-blade ($\varnothing 92$ mm) hollow turbine + 90% slanted eye-shaped block		88.2	4.85

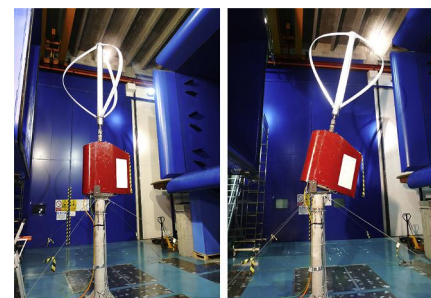
Gambar 2. Instalasi penelitian 1.



Gambar 3. Instalasi penelitian 2.



Gambar 4. Instalasi penelitian 3.



Gambar 5. Instalasi penelitian 4.

METODOLOGI PENELITIAN.

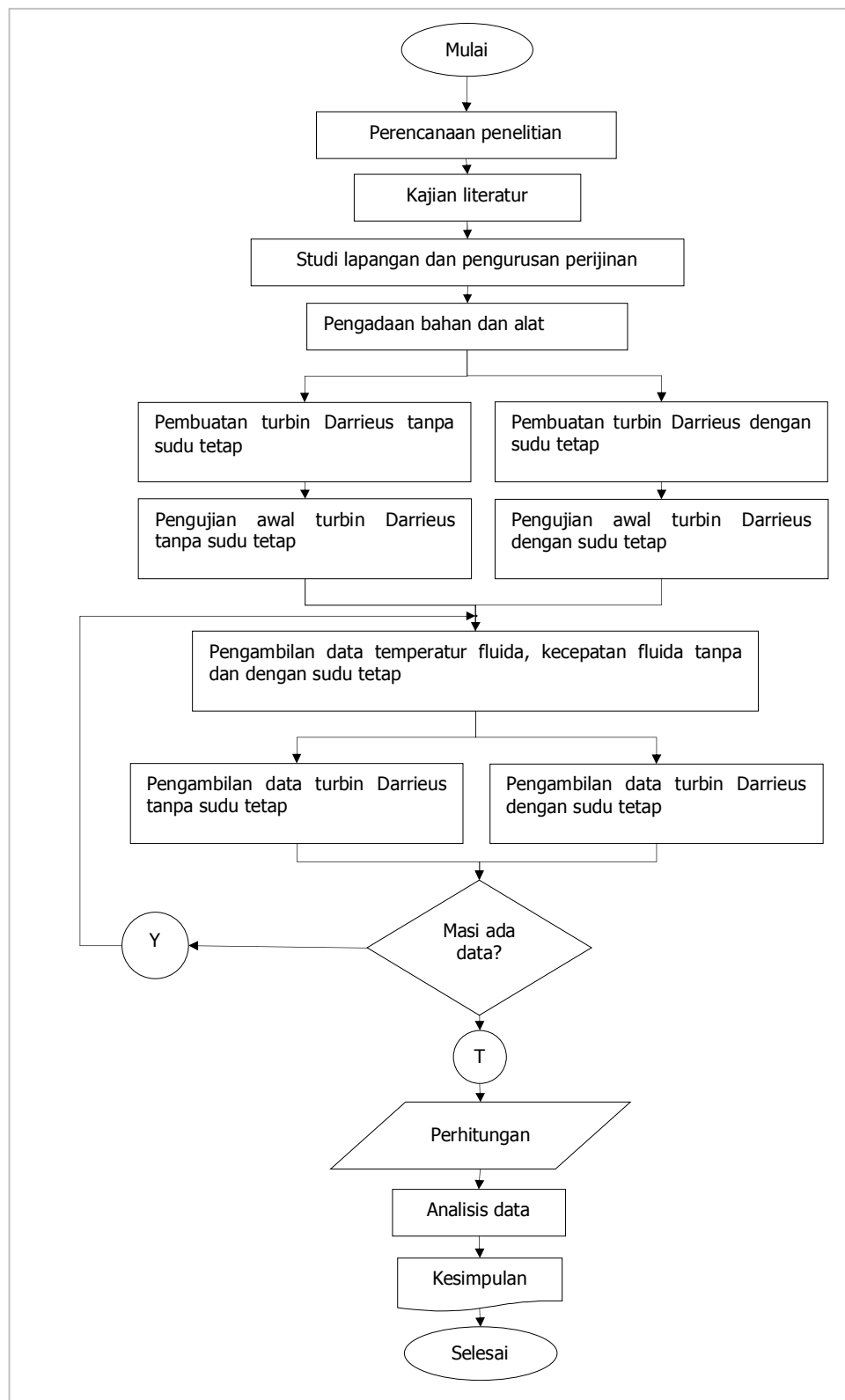
Diagram alir penelitian ini diperlihatkan pada gambar 6. Bahan dan alat penelitian ini terdiri dari: turbin Darrieus tanpa sudu tetap, dan turbin Darrieus dengan sudu tetap, stopwatch, pelampung, tachometer digital, timbangan pegas digital, dan thermometer air raksa.

Instalasi penelitian ini diperlihatkan pada gambar 7 dan memiliki prinsip kerja sebagai berikut. **Turbin Darrieus tanpa sudu tetap.** Air dengan kapasitas tertentu mengalir bebas tanpa hambatan dari titik A ke titik B. Sementara air sedang mengalir, turbin Darrieus dimasukan ke dalam aliran air. Dalam kondisi turbin terendam, aliran air akan melewati turbin tersebut sehingga kecepatan air akan mengalami penurunan. Penurunan kecepatan aliran air tersebut diakibatkan oleh sebagian kecepatan air terabsorb ke turbin. Oleh karena bentuk kontruksi turbin Darrieus yang memiliki karakteristik tertentu, kecepatan air yang terabsorb tersebut menyebabkan poros turbin berputar. Putaran poros ini mengindikasikan bahwa energi aliran air tekanan rendah telah terkonversi menjadi energi mekanik. **Turbin Darrieus dengan sudu tetap.** Prinsip kerja turbin Darrieus dengan sudu tetap sama dengan prinsip kerja turbin Darrieus tanpa sudu tetap hanya saja dilakukan penambahan luas pada sisi masuk aliran air dan mempertahankan luas pada penampang turbin. Kondisi ini mengakibatkan kecepatan air pada penampang turbin akan meningkat.

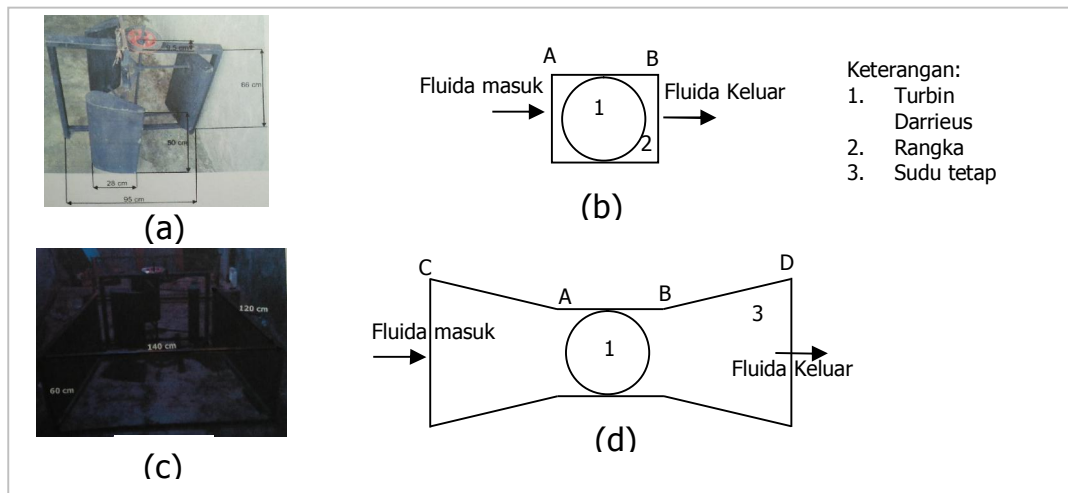
Penelitian dilakukan melalui penggunaan alat-alat secara manual. Pengukuran temperatur air dilakukan dengan thermometer. Temperatur air yang terukur digunakan untuk menentukan densitas air melalui teknik interpolasi berdasarkan tabel densitas air. Pengukuran kecepatan aliran air

menggunakan stopwatch dan pelampung. Pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap (gambar 7a), pengukuran kecepatan aliran air dilakukan melalui penentuan waktu yang dibutuhkan pelampung untuk mencapai titik akhir B dari titik awal A. Kecepatan diperoleh dengan membagi jarak yang ditempu pelampung (titik A dan B) dengan waktu tempuh pelampung. Pada turbin Darrieus dengan sudu tetap (gambar 7b), pengukuran kecepatan air dilakukan dengan cara yang sama; pengukuran kecepatan pelampung yang melalui titik A ke titik B. Air masuk pada sudu tetap melalui sisi masuk C yang lebih luas kemudian melalui titik A dan titik B serta meninggalkan sudu tetap melalui sisi keluar D. Kontruksi seperti ini yang menyebabkan kecepatan pada bagian yang lebih sempit lebih besar dari pada bagian yang lebih luas. Putaran pada poros turbin diukur dengan tachometer. Putaran poros diukur pada saat terjadi pembebanan pada jari-jari flens. Besarnya beban yang terjadi pada flens dapat dibaca pada timbangan pegas digital yang terpasang tegak lurus terhadap jari-jari flens. Flens disambung ke poros yang berhubungan langsung dengan sudu gerak. Tumbukan air pada sudu gerak menyebabkan poros turbin berputar. Untuk menentukan karakteristik turbin yang lainnya maka dilakukan perhitungan berdasarkan teori yang ada.

Penelitian dilakukan pada saluran air baku PDAM Kota Makassar di wilayah Antang. Waktu pengambilan data pada tanggal 15 Desember 2016.



Gambar 6. Diagram alir penelitian



Gambar 7. Instalasi penelitian. (a) Turbin Darrieus tanpa sudu tetap. (b) Penyederhanaan gambar turbin Darrieus tanpa sudu tetap. (c) Turbin Darrieus dengan sudu tetap. (d) Penyederhanaan gambar turbin Darrieus dengan sudu tetap.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL.

Data hasil pengukuran dan perhitungan diperlihatkan pada tabel 1. Temperatur air = 28°C , densitas air = 998 kg/m^3 , jari-jari pembebanan = $9,5 \text{ cm}$, diameter turbin = 95 cm , diameter poros = 16 mm , kecepatan aliran air tanpa hambatan = $0,503 \text{ m/s}$. Kontruksi turbin tanpa dan dengan sudu tetap serta ukurannya diperlihatkan pada gambar 7b dan 7c.

PEMBAHASAN.

Lebar turbin Darrieus yang digunakan sangat kecil bila dibandingkan dengan lebar saluran air baku PDAM wilayah Antang. Perbedaan ukuran ini mengindikasikan bahwa kapasitas air yang mengalir pada saluran tidak dimanfaatkan seluruhnya untuk menggerakkan turbin. Kapasitas air yang digunakan untuk menggerakkan turbin hanya berdasarkan hasil perkalian antara kecepatan air dengan luas penampang turbin dengan

sudu tetap atau penampang turbin tanpa sudu tetap.

Kecepatan air pada saluran air baku PDAM diasumsikan sama dengan kecepatan air pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap dan sama dengan kecepatan air masuk sudu tetap pada turbin Darrieus dengan sudu tetap. Asumsi kesamaan kecepatan ini dilakukan karena data kecepatan air diambil pada lokasi yang sama.

Perbedaan kecepatan dalam penelitian ini terjadi akibat ada dan tidaknya pemasangan sudu tetap pada kontruksi turbin Darrieus. Dari hasil pengkuran, kecepatan fluida pada turbin yang dilengkapi dengan sudu tetap lebih besar dari pada yang tidak dilengkapi dengan sudu tetap. Berdasarkan persamaan kontinuitas, seharusnya kecepatan pada bagian sempit sudu tetap lebih besar lagi.

Pada turbin Darrieus yang dilengkapi dengan sudu tetap, penggunaan persamaan kontinuitas pada perhitungan perubahan kecepatan aliran fluida akibat perubahan luas penampang tidak memberikan hasil yang sama dengan hasil

pengukuran. Hal ini terjadi karena selain faktor teknis, faktor konstruksi sudu tetap juga dapat memberikan ketidakseimbangan ini. Konstruksi sudu tetap yang hanya mempersempit penampang bagian atas dan bagian bawah sudu tetap (gambar 7d) mengakibatkan sebagian masa air meluap (mengarah keluar dari lembar kertas ini) sehingga sebagian masa air tersebut tidak mengenai sudu gerak turbin yang terpasang.

Pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap, kecepatan air yang mengenai turbin diasumsikan sama dengan kecepatan air pada saluran air baku PDAM. Meskipun turbin hanya mengambil sebagian kecil dari lebar saluran air baku PDAM, kecepatan pada setiap titik di sepanjang lebar saluran diasumsikan sama. Kesamaan asumsi ini untuk memperjelas hasil analisis karakteristik turbin dengan dan tanpa sudu tetap.

Turbin Darrieus yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil buatan sendiri pada laboratorium Teknik Mesin Universitas Atma Jaya Makassar dengan mengabaikan ukuran standar turbin. Profil sudu gerak yang terpasang pada turbin Darrieus menyerupai profil NACA simetrik dan juga mengabaikan bentuk dan ukuran standar NACA yang sudah ada. Meskipun demikian, turbin dengan bentuk dan ukuran yang sama ini hanya digunakan untuk menganalisis karakteristiknya jika dengan dan tanpa sudu tetap. Dengan demikian fokus kajian akibat penambahan sudu tetap pada turbin Darrieus ini dapat dilakukan.

Pemberian beban yang membesar pada kampas rem mengakibatkan gesekan yang terjadi antara flens dan kampas rem membesar sehingga menurunkan bahkan dapat menghentikan putaran poros turbin. Pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap, pemberian beban maksimum 5 kg menimbulkan putaran poros turbin terendah. Bila pemberian beban ditingkatkan lagi maka poros akan berhenti

berputar. Pada kondisi ini, efisiensi turbin mengalami penurunan jika dibandingkan dengan pemberian beban sebelumnya; 4 kg. Pada turbin Darrieus dengan sudu tetap, meskipun pemberian beban maksimum menimbulkan putaran poros mengalami penurunan, pemberian beban masih dapat ditingkatkan lagi. Pada kondisi beban 1 kg hingga 5 kg, efisiensi turbin masih terus mengalami peningkatan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa turbin Darrieus dengan sudu tetap memiliki karakteristik yang lebih baik dari pada tanpa sudu tetap.

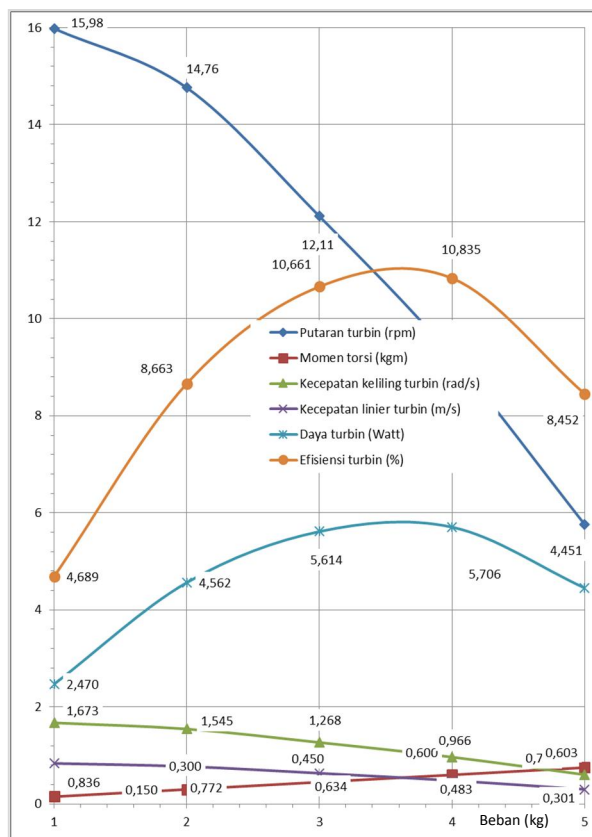
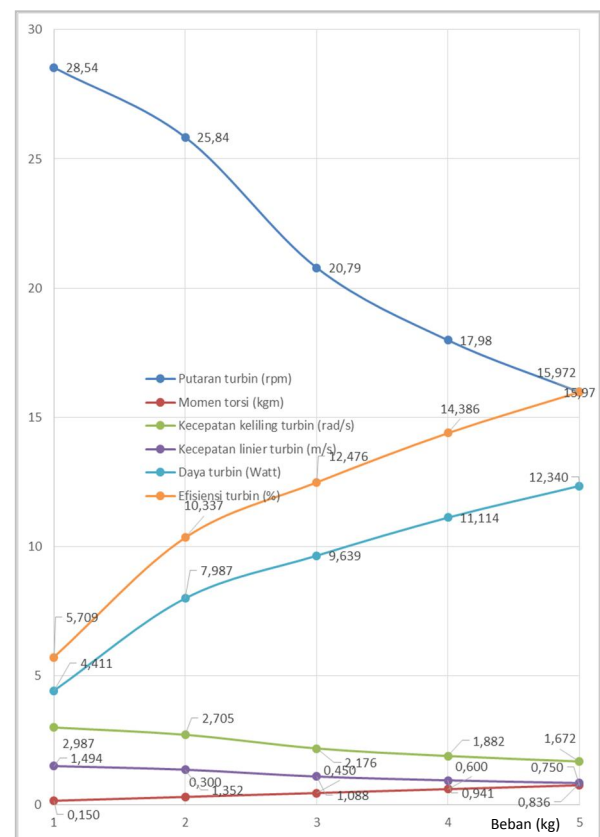
Semakin besar beban yang diberikan maka putaran poros turbin, kecepatan linier, dan kecepatan sudut turbin mengalami penurunan. Hal ini terjadi pada turbin dengan dan tanpa sudu tetap. Pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap, pada beban minimal 1 kg, putaran poros turbin sebesar 15,98 rpm, kecepatan linier turbin sebesar 0,836 m/s, dan kecepatan sudut turbin sebesar 1,673 rad/s. Pada beban maksimum 5 kg, putaran poros turbin sebesar 5,76 rpm, kecepatan linier turbin sebesar 0,301 m/s, dan kecepatan sudut turbin sebesar 0,603 rad/s.

Semakin besar beban yang diberikan maka momen torsi, daya turbin, dan efisiensi turbin mengalami kenaikan. Hal ini terjadi pada turbin dengan dan tanpa sudu tetap. Pada turbin Darrieus tanpa sudu tetap, pada pemberian beban 1 kg maka momen torsi yang terjadi sebesar 0,15 kgm, daya turbin sebesar 2,470 Watt, dan efisiensi turbin sebesar 4,689 %. Pada pemberian beban maksimum 5 kg maka momen torsi yang terjadi sebesar 0,75 kgm, daya turbin sebesar 4,451 Watt, dan efisiensi turbin sebesar 8,452 %.

Semakin besar kecepatan fluida akibat penambahan sudu tetap menyebabkan peningkatan seluruh karakteristik turbin sebesar 3,5 % kecuali momen torsi.

Tabel 1. Hasil Perhitungan.

Konstruksi turbin Darrieus	Kecepatan fluida (m/s)	Beban (kg)	Putaran turbin (rpm)	Momen torsi (kg.m)	Kecepatan keliling turbin (rad/s)	Kecepatan linier turbin (m/s)	Daya turbin (Watt)	Efisiensi turbin (%)
Tanpa sudu tetap	0,503	1	15,98	0,15	1,673	0,836	2,470	4,689
		2	14,76	0,30	1,545	0,772	4,562	8,663
		3	12,11	0,45	1,268	0,634	5,614	10,661
		4	9,23	0,60	0,966	0,483	5,706	10,835
		5	5,76	0,75	0,603	0,301	4,451	8,452
Dengan sudu tetap	0,643	1	28,54	0,15	2,987	1,494	4,411	5,709
		2	25,84	0,30	2,705	1,352	7,987	10,337
		3	20,79	0,45	2,176	1,088	9,639	12,476
		4	17,98	0,60	1,882	0,941	11,114	14,386
		5	15,97	0,75	1,672	0,836	12,340	15,972

**Gambar 8.** Karakteristik turbin Darrieus tanpa sudu tetap**Gambar 9.** Karakteristik turbin Darrieus dengan sudu tetap

KESIMPULAN

Turbin Darrieus yang tidak memiliki sudu tetap menghasilkan karakteristik turbin yang tidak maksimal. Efisiensi turbin mengalami peningkatan hingga pemberian beban mencapai 4 kg. Efisiensi turbin akan mengalami penurunan jika pemberian beban mencapai 5 kg. Dari hasil pengujian, jika pemberian beban ditingkatkan lagi maka poros turbin akan berhenti berputar.

Turbin Darrieus yang dilengkapi dengan sudu tetap memiliki karakteristik turbin yang lebih baik. Efisiensi turbin mengalami peningkatan hingga pemberian beban 5 kg. Dari hasil pengujian, pemberian beban masih dapat ditingkatkan dan tidak menghentikan putaran poros turbin.

Turbin Darrieus yang dilengkapi dengan sudu tetap dapat meningkatkan putaran, kecepatan keliling, kecepatan

linier, daya, dan efisiensi turbin sebesar 3,5 %.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Akbar, M. & Mustafa, V., 2016. A new approach for optimization of Vertical Axis Wind Turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 153, pp.34–45. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.006>.
- Batista, N.C. et al., NEW BLADE PROFILE FOR DARRIEUS WIND TURBINES CAPABLE TO SELF-START.
- Battisti, L. et al., 2016. Wind tunnel testing of the DeepWind demonstrator in design and tilted operating conditions. *Energy*, 111, pp.484–497. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.080>.
- Beri, H. & Yao, Y., 2011. Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine. , 2011(July), pp.262–270.
- Faez, H., El-shafie, A. & Karim, O.A., 2012. Tidal current turbines glance at the past and look into future prospects in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp.5707–5717. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.016>.
- Gorban, A.N., Gorlov, A.M. & Silantyev, V.M., 2016. Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. , 123(December 2001), pp.311–317.
- Guerrero-villar, F. et al., 2015. Development of Vertical Wind Turbines via FDM Prototypes. *Procedia Engineering*, 132, pp.78–85. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.482>.
- Ismail, F. & Vijayaraghavan, K., 2015. The effects of aerofoil profile modification on a vertical axis wind turbine performance. , 80, pp.20–31.
- Loots, I. et al., 2015. A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, pp.1254–1268. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.064>.
- Maître, T., Amet, E. & Pellone, C., 2013. Modeling of the flow in a Darrieus water turbine: Wall grid refinement analysis and comparison with experiments. *Renewable Energy*, 51, pp.497–512. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.030>.
- Mertens, S.M., 2005. Small wind turbines for the built environment. , pp.11–15.
- Toja-Silva, F., Colmenar-Santos, A. & Castro-Gil, M., 2013. Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions - Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.364–378. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.052>.
- Vasthava, R.S. & Kumar, K.A., 2015. Modification of Straight Bladed Hollow Cored Wind Turbine Through Experimental Analysis. , 4(8), pp.1359–1364.